

*Динамичка еволуција планетских система II :
Ера диска планетезимала и настанак
терестричких планета*

Зоран Кнежевић

Астрономска опсерваторија & САНУ, Београд

Катедра за астрономију МФ, Београд 28.4.2015.

(i) Рана еволуција џинова у гасном диску

$< 5 \cdot 10^4$ год

(ii) Еволуција џинова у интеракцији са диском планетезимала

$< 10^6$ год

(iii) Еволуција терестричких планета

$< 10^8$ год

Настанак планета џинова

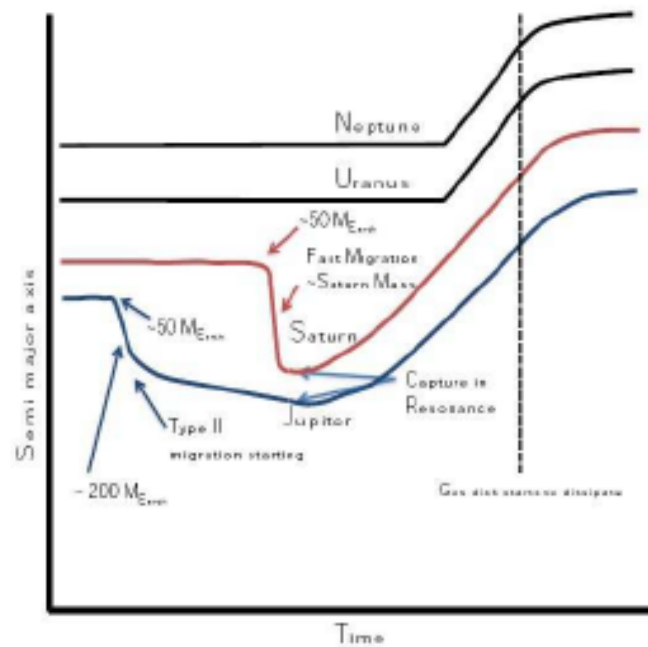
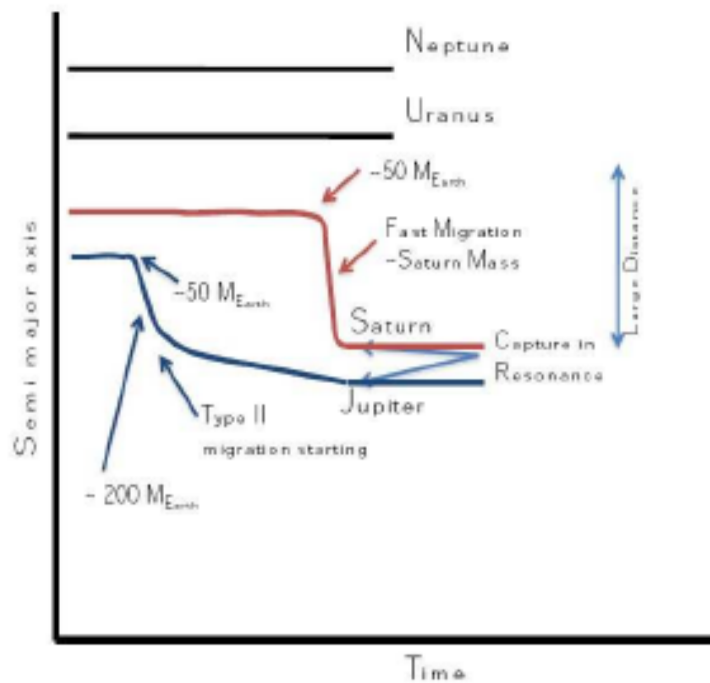
Миграције типа I и II

Расејање планете планетом

Резонантне конфигурације

Сунчев систем

Могући сценарио за Сунчев систем



Планете на крају еволуције у резонанци 4 тела
Компактна орбитална конфигурација
Мале ексцентричности

Стабилност могућа до 1 милијарде година
Нестабилност због диска планетезимала

(ii) Ера диска планетезимала

Планетезимали: мала тела по величини и хемијском саставу слична данашњим астероидима и кометама

Диск планетезимала 100 x мање масе од гасног диска

Планета у диску трпи многобројне блиске сусрете са објектима диска, мења њихове путање, па и сама осећа мало повратно дејство. Ако је диск довољно масиван - миграција

Расејање планетезимала није случајно:

Ако $H = [a(1-e^2)]^{1/2} \cos i > H_p$, планетезимали приликом блиског сусрета имају већу азимуталну угловну брзину, планета их успорава, а они убрзавају планету која мигрира према ван. За $H < H_p$, обрнуто.

$$\frac{da_p/a_p}{dt/T} \sim MF$$

F – функција расподеле по H, ако је F негативно миграција према унутра и обрнуто

T – орбитални период планете

M – укупна маса планетезимала који прилазе планети

Када планета мигрира три паралелна и конкурентска процеса:

(а) планетезимали улазе и излазе из региона блиских сусрета, планета мигрира не мењајући F, али се M мења зависно од градијента површинске густине

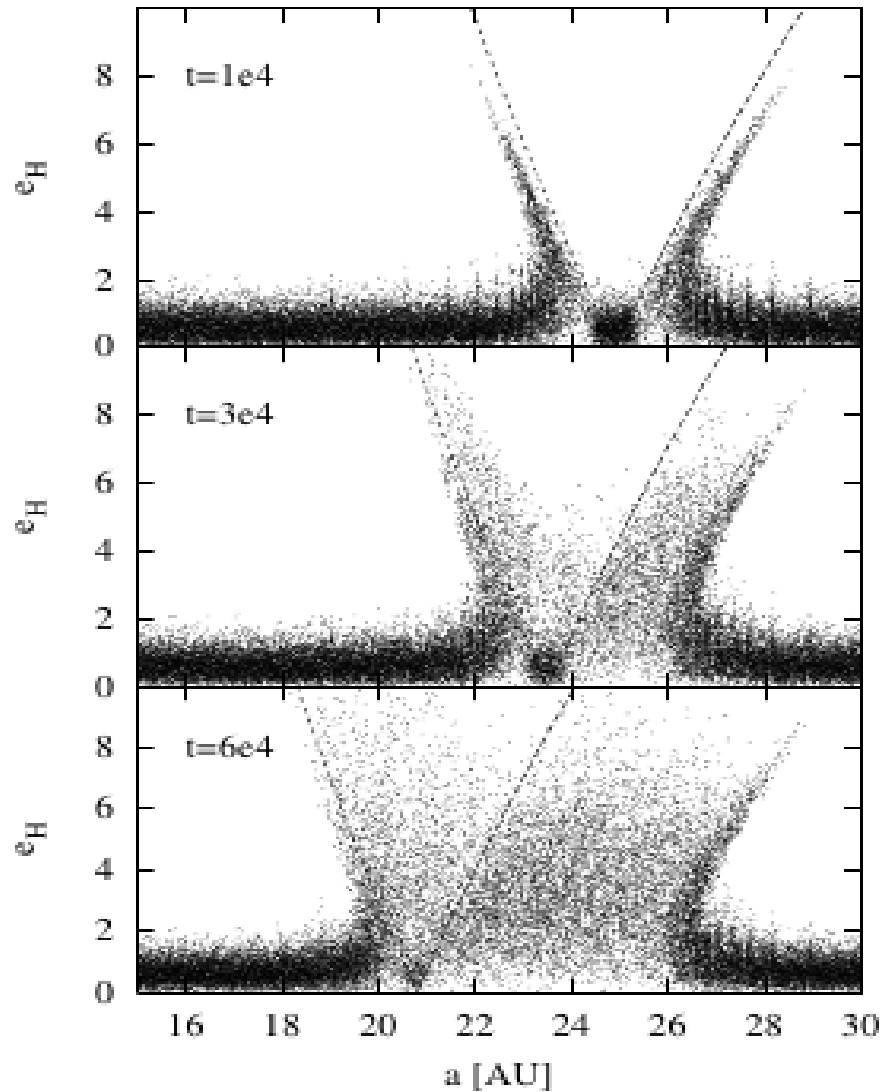
(б) блиски сусрети мењају расподелу угловних момената тако да ова поприма равнотежни облик, што одговара стању у којем нема миграције: F тежи нули, M се не мења

(в) Део планетезимала се путем судара са планетом или преласка на хиперболичке путање уклања из система: M се смањује

Ако $|MF|$ расте – **принудна** или **самоодржива** миграција

Ако $|MF|$ опада – **пригушена** миграција

(a)



Планета $2.3M_{\oplus}$

Диск $230M_{\oplus}$

Планетезимали
“остају позади”

Две и више планета

Планетезимали се расејавају од стране једне планете тако да имају блиске прилазе другој

Трансфер планетезимала испод контроле једне планете под контролу друге тежи да повећа орбитално растојање планета

Нумеричке симулације еволуције Сунчевог система:

Јупитер мигрира према унутра, Сатурн, а још више Уран и Нептун, према ван



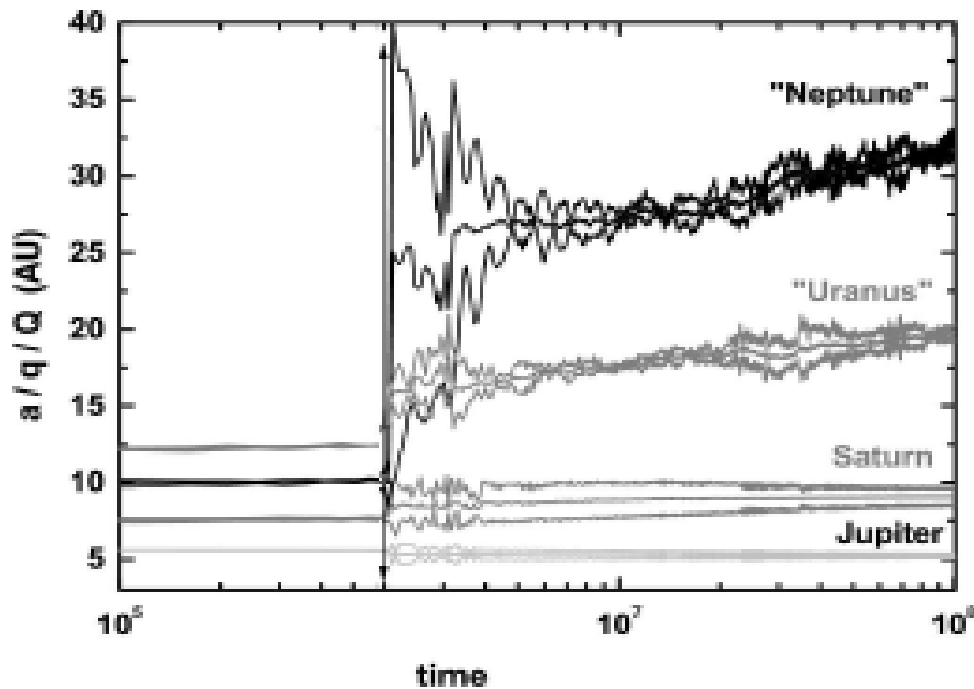
Nice model v1.0 (2005)

Пригушена миграција, спољашњи руб диска на 30 АЈ

Интеракција са планетезималима (динамичко трење) смањује ексцентричности и нагибе планета, повећава оне планетезимала – фаза нестабилности планета да би се добиле данашње вредности

Nice model v2.0 (2011)

Компактна резонантна конфигурација на крају ере гасног диска: С-Ј 2/3, У-С 2/3, Н-У 3/4. Диск $50M_{\oplus}$. $r=30$ АЈ



Планетска растојања фиксна.
Интеракција са планетезималима мења ексцентричности.
Излаз из резонанце.

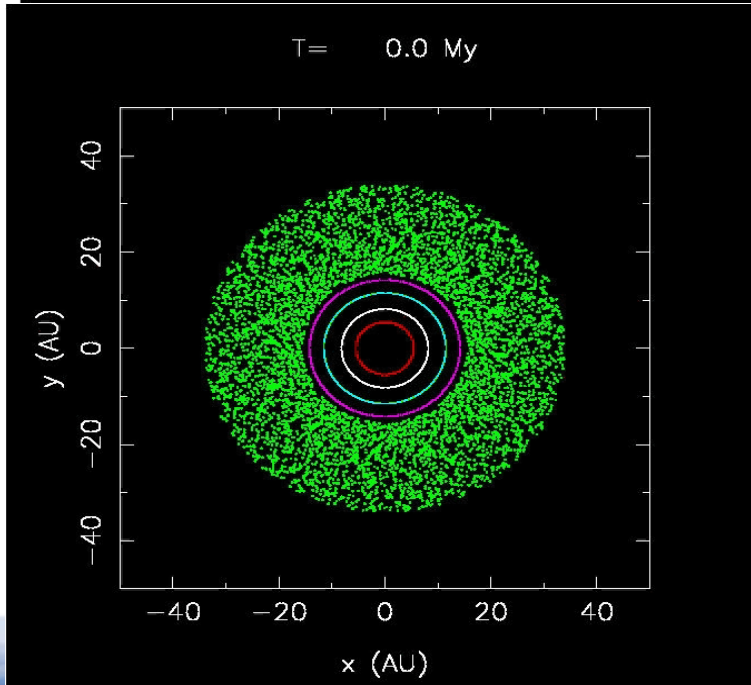
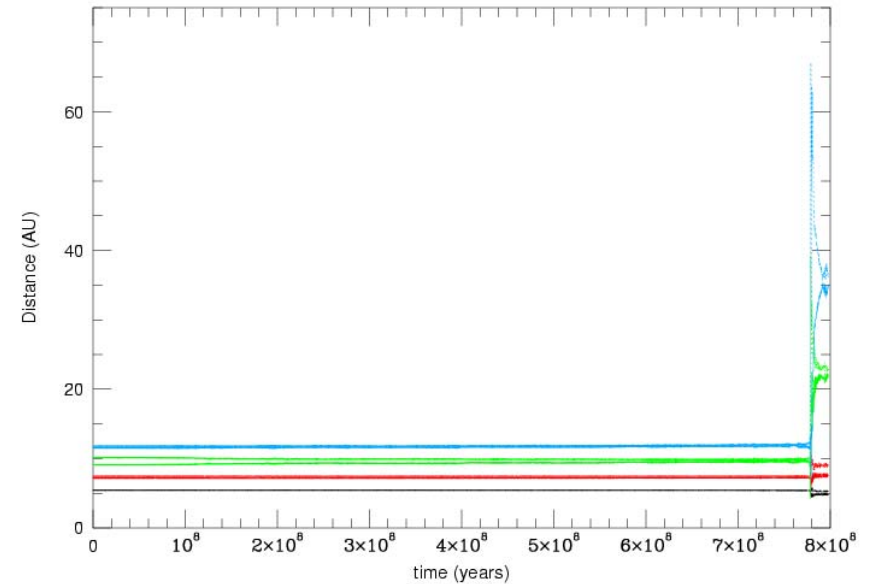
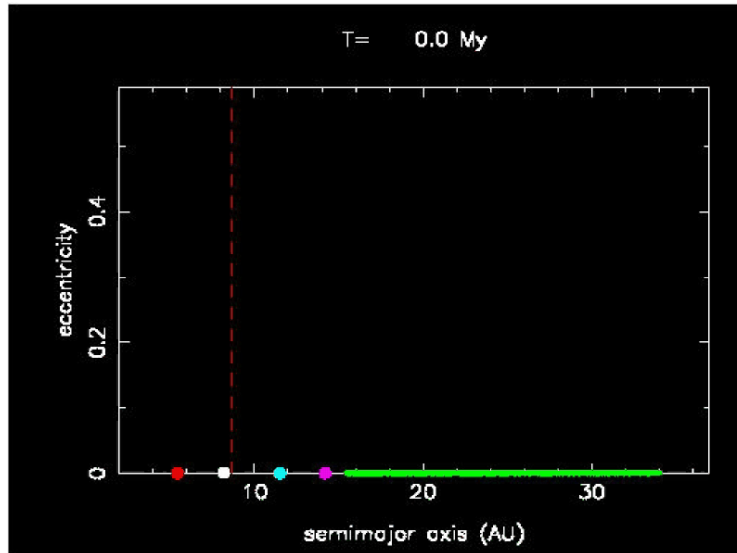
Нестабилност због близине: пораст ексцентричности и растојања, динамичко трење смањује ексцентричности, наставља се миграција и увећавају се растојања .

На крају планете на орбитама сличним данашњим (10%). Диск расејан, после 100 Мг престанак миграције.

Проблем: нестабилност наступа 2 Мг након почетка симулације !?

Late Heavy Bombardment (LHB)

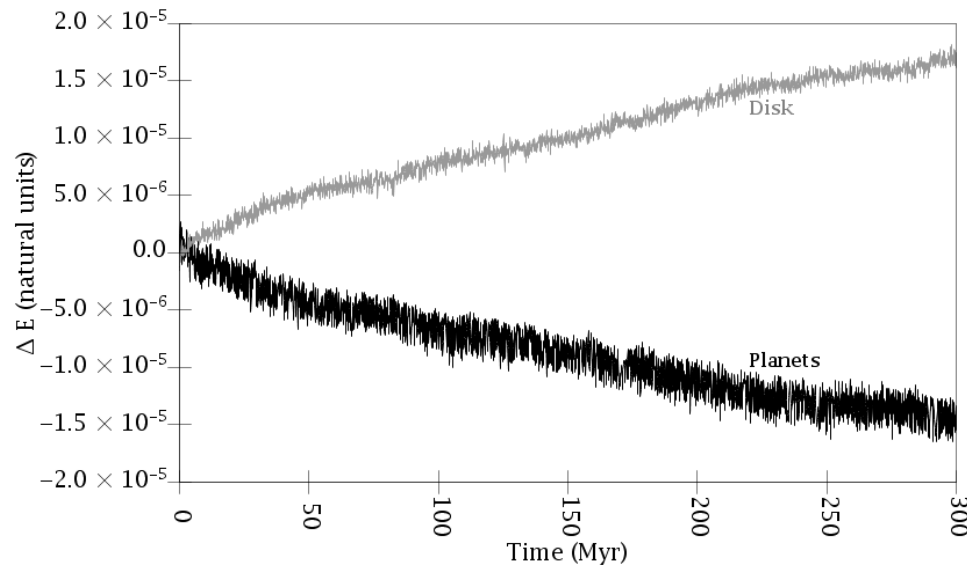
Хипотетички катаклизмични период пре око 3.9 милијарди година (кратери на Месецу)



Масивни резервоар
планетезимала
стабилан 600 Мг
изненада се
дестабилизује → транс
Нептунски регион.
(Пре)осетљивост на
почетне услове.

Nice model v2.0 (2011)

- Шта је недостајало ? → гравитациона интеракција међу планетезималима
- *Секуларна размена енергије између диска и планета, без блиских прилаза*
- *Планетска растојања се смањују*
- Спори пораст ексцентричности у резонанцама → секуларне и секундарне резонанце = *нестабилност!*



Успешност модела 10%

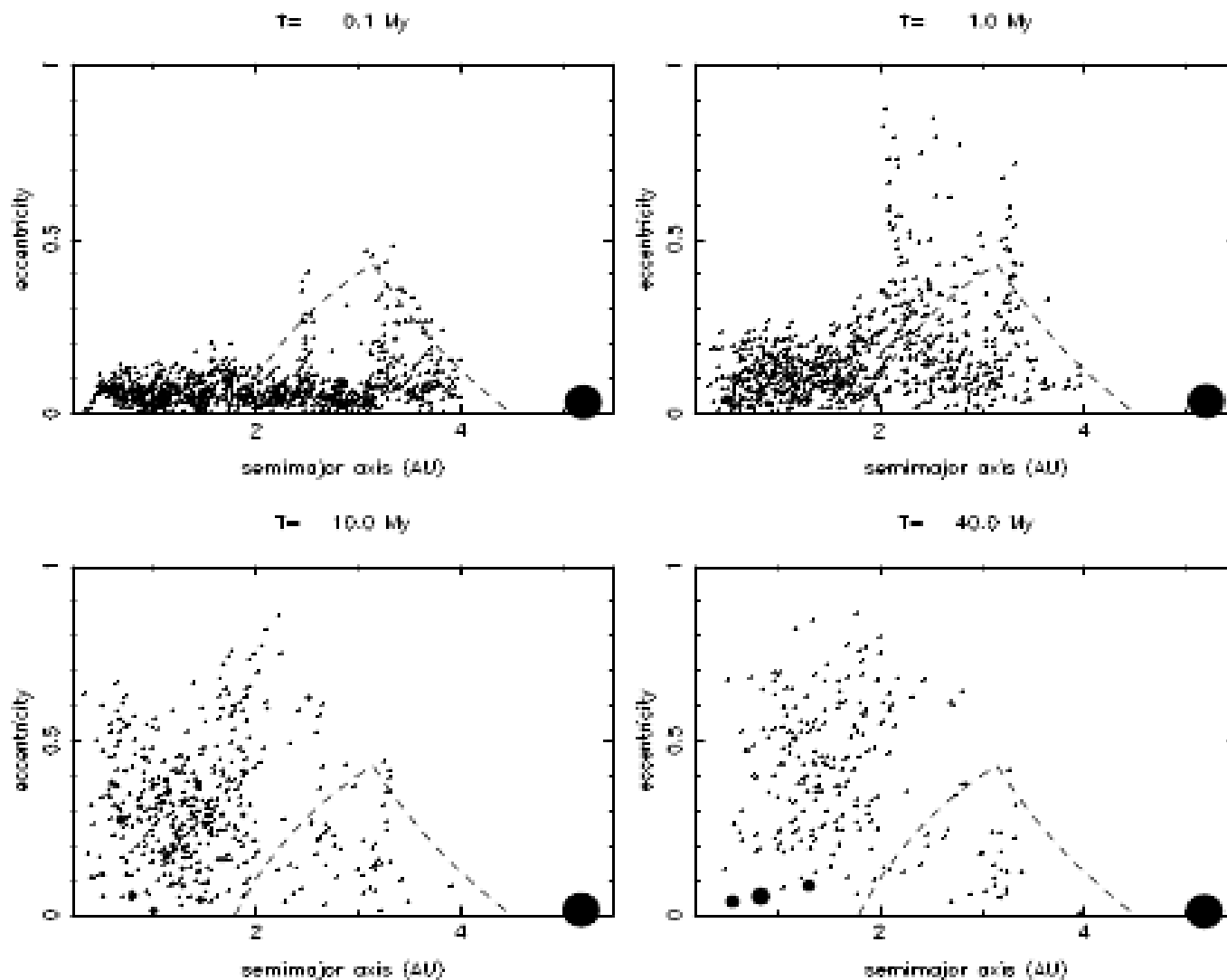
Постаје знатно већа, ако:

Пета планета??




(iii) Планете Земљиног типа (терестричке планете)

- Настају у унутрашњем делу прото-планетарног диска, унутар “снежне линије” (3-5 AJ)
- “Runaway” и “oligarchic” раст
- Планетски ембриони масе Месеца до Марса
- Ембриони 50%, остатак планетезимали величине данашњих астероида
- По нестанку гаса, нестабилна динамика због поремећаја од џиновских планета и осталих ембриона
- Путање се секу, судари, раст
- Динамичко трење, планетезимали се расејавају на путање високе ексцентричности и нагиба, највеће планете на стабилним путањама најмањих e, i




Формирање терестричких планета



Аргументи у прилог сценарија:

- Симулације које почињу са $\sim 5M_{\oplus}$ дају 2-5 планета, 2 величине Земље, 50% масе ембриона и планетезимала
- Орбите реалистичне
- Чести квази-тангентни удари ембриона величине Марса формирају дискове материје око прото-планета 
сателити ()
- Време акреције 30-100 Мг, у сагласности са радиоактивном хронометријом
- У астероидном појасу нема планета
- 10-20% масе из спољашњег астероидном прстена 
ВОДА

Аргументи у прилог сценарија:

- Симулације дају 2-5 планета, 2 величине Земље, 50% масе ембриона и планетезимала
- Орбите реалистичне
- Чести квази-тангентни удари ембриона величине Марса формирају дискове материје око прото-планета 
сателити ()
- Време акреције 30-100 Мг, у сагласности са радиоактивном хронометријом
- У астероидном појасу нема планета
- 10-20% масе из спољашњег астероидном прстена 
ВОДА

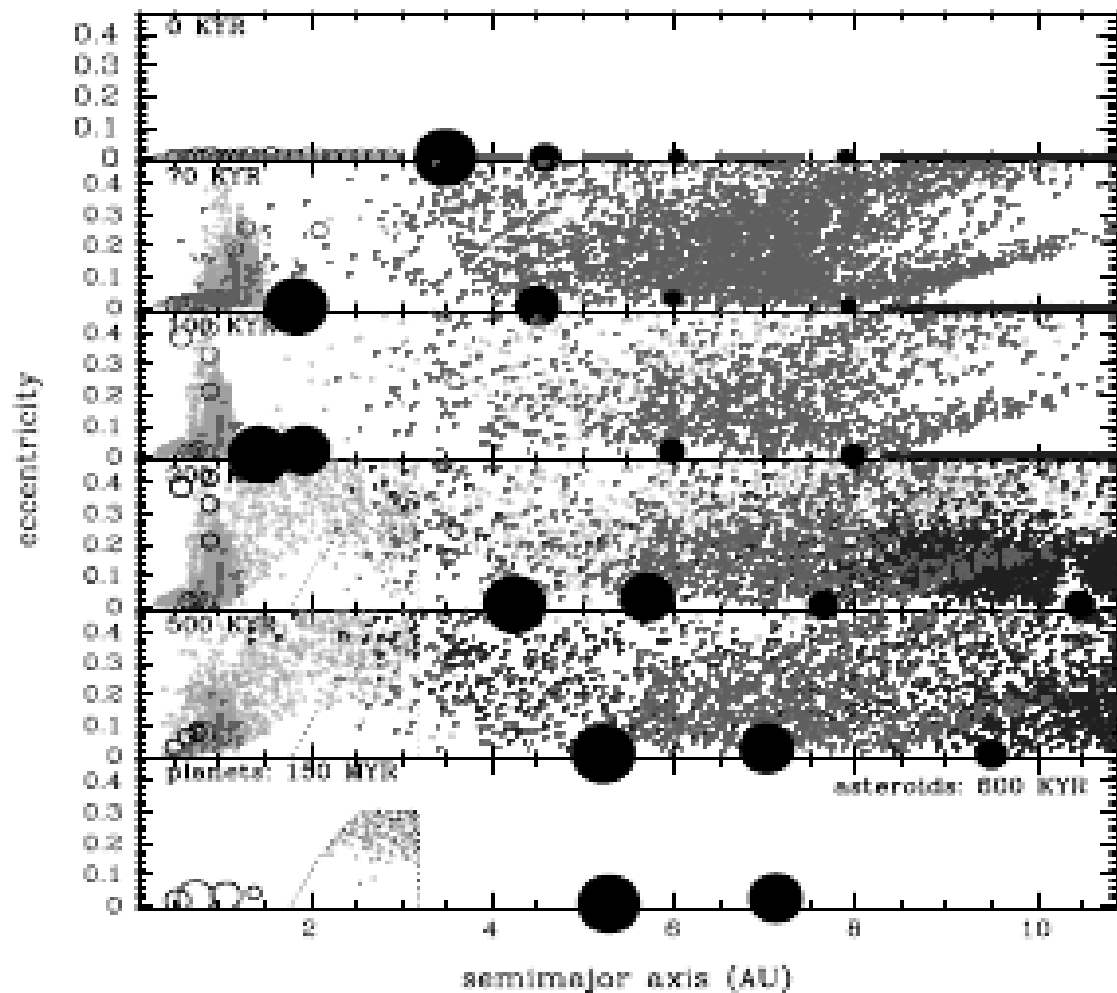
МАРС СУВИШЕ МАЛЕН, ФОРМИРАО СЕ ПРЕБРЗО!!

Коректан однос маса Земља/Марс ~ 10 , ако диск ембриона и планетезимала има спољну границу на ~ 1 АЈ; али астероиди на 2-4 АЈ

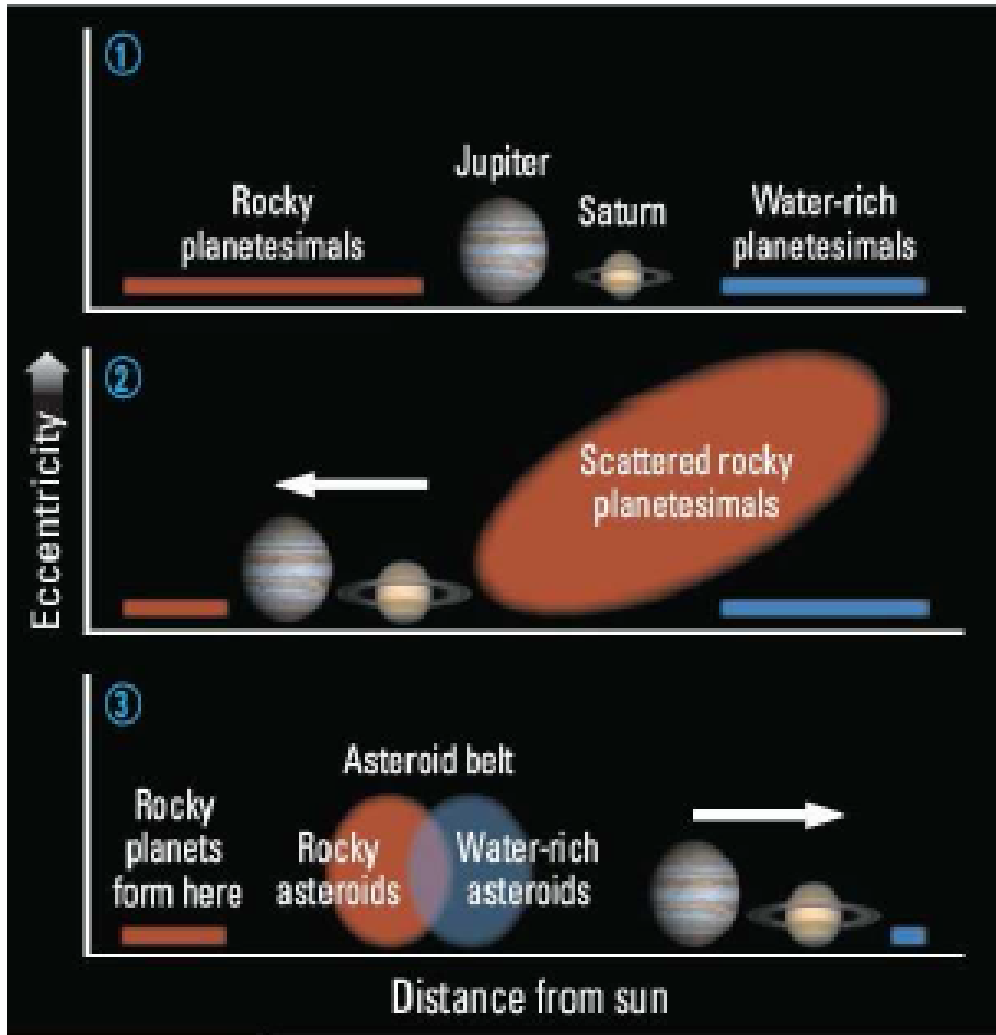
Grand Tack (Велика промена правца)

- У гасном диску Јупитер мигрира према унутра док Сатурн још расте
- Кад Сатурн нарасте до садашње масе, почиње да мигрира према унутра брже од Јупитера док не уђе у резонанцу 2/3
- Заједничка миграција према ван до нестанка гаса
- Модели миграције унутра/ван: време између формирања Ј и С, брзина миграције унутра (вискозност) и ван (дебљина диска), време између резонанце Ј и С и евапорације гаса
- Промена смера када је Јупитер био на 1.5 АЈ, спољашњи руб унутрашњег диска на 1 АЈ!!
- Појас великих ембриона 0.7 – 1 АЈ, Венера и Земља расту унутар прстена, Меркур и Марс избачени, престанак раста – мали Марс

Формирање терестричких планета



Grand Tack (тест)



Јупитер два пута
пролази кроз
астероидну зону !!!

Унутрашњи део
астероидног прстена
се више насељава
планетезималима из
унутрашњег дела
диска (S-тип), а
спољашњи део
планетезималима који
су се налазили између
путања џиновских
планета (C-тип)

Еволуција терестричких планета за време периода нестабилности џинова пре 3.9 милијарди година

Блиски прилази међу џиновима



Орбите џинова постају ексцентричне а међусобна растојања расту до данашњих вредности

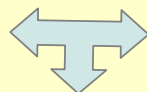


Јупитер **нема** блиске сусрете са другим џиновима (који имају међусобне блиске сусрете)

Јупитер **има** блиске сусрете са другим џиновима (У и/или Н) (**jumping Jupiter**)

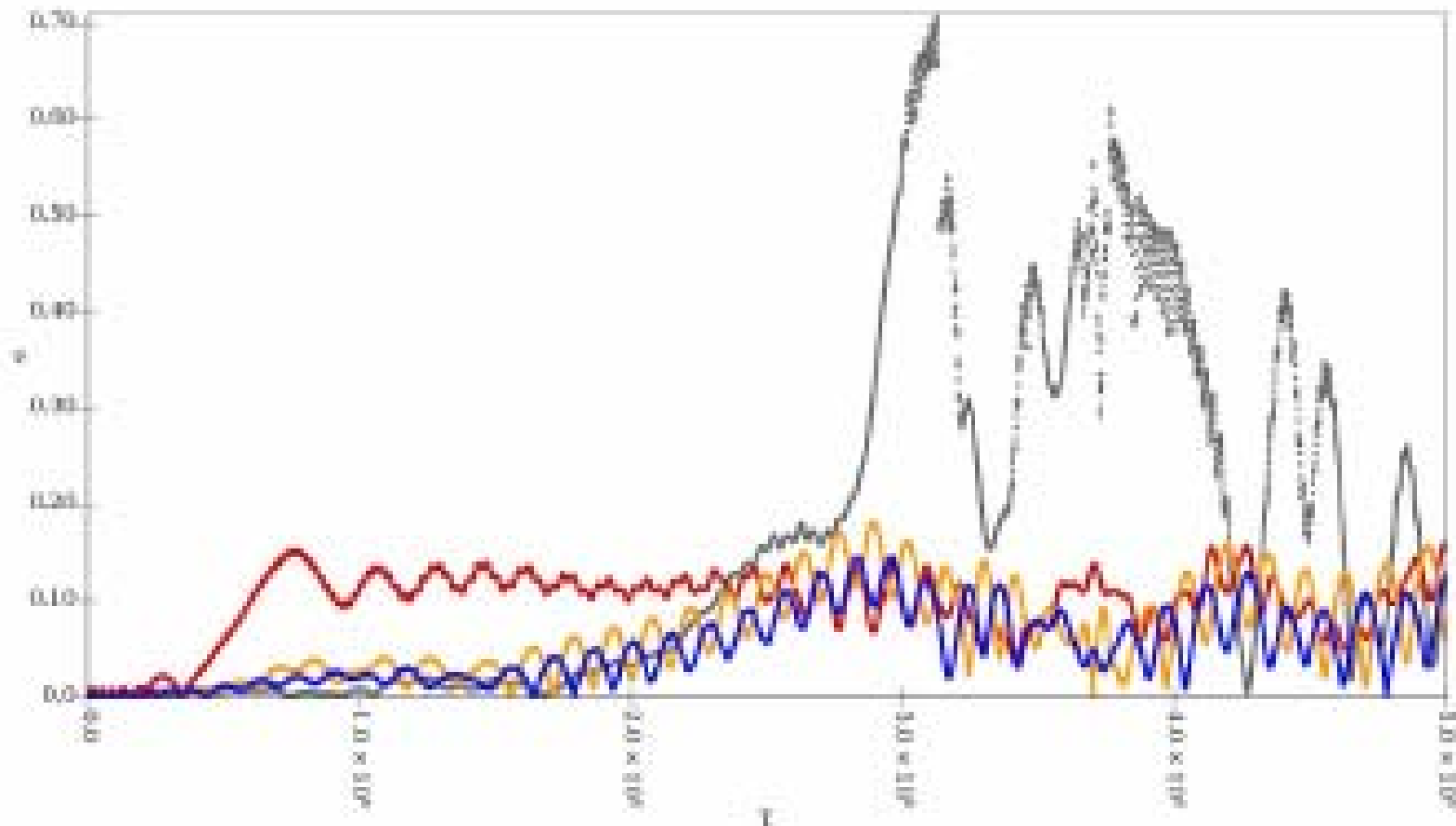
Интеракција са планетезималима (спора еволуција <math>< 10^7</math> година)

Блиски сусрети са планетама (брза еволуција <math>< 10^5</math> година)



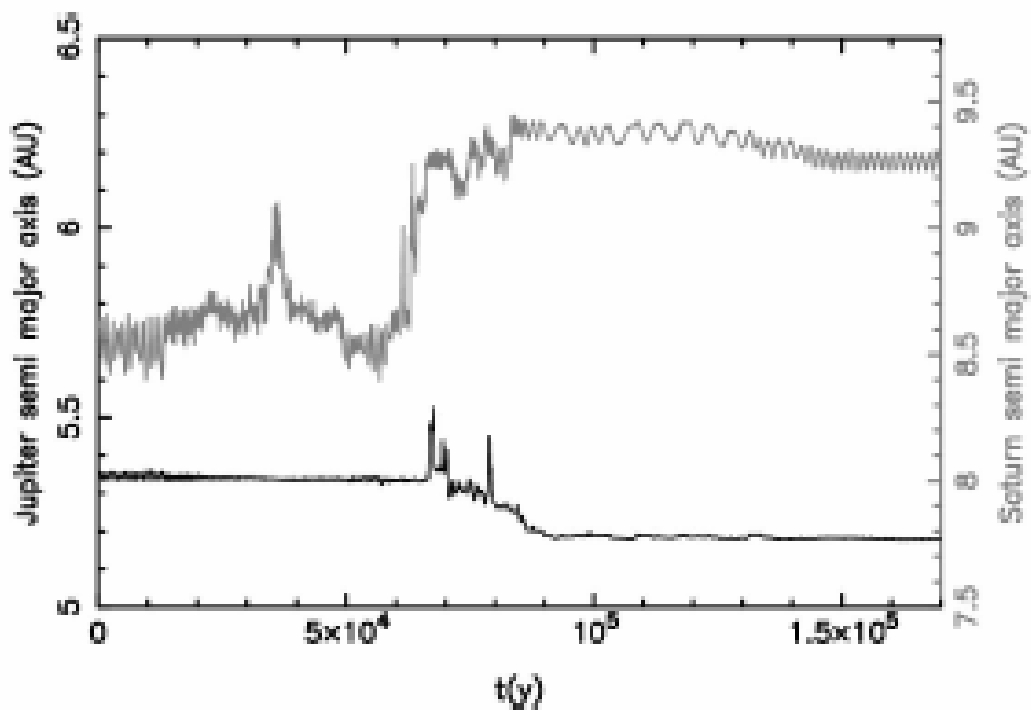
Пораст орбиталног растојања и ексцентричности Ј и С

Спора еволуција – велике секуларне промене ексцентричности



Некомпатибилно са садашњим
ексцентричностима планета и астероида!!

Брза еволуција не даје довољно времена да се орбите терестричких планета знатније промене

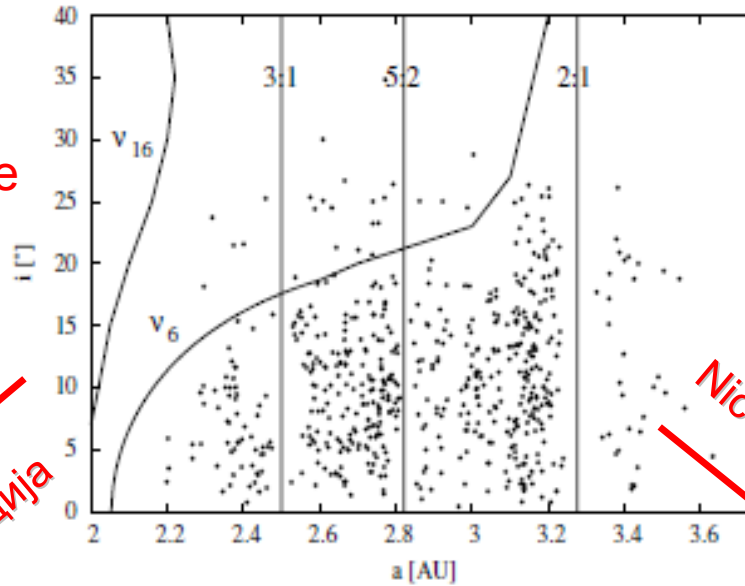


Пример “jumping Jupiter” еволуције: орбите терестричких планета и астероида сличне данашњим

Тест: астероидни прстен

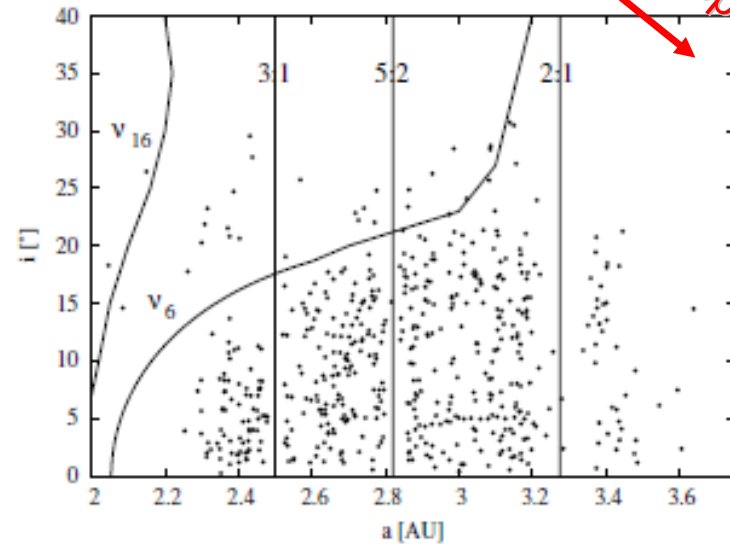
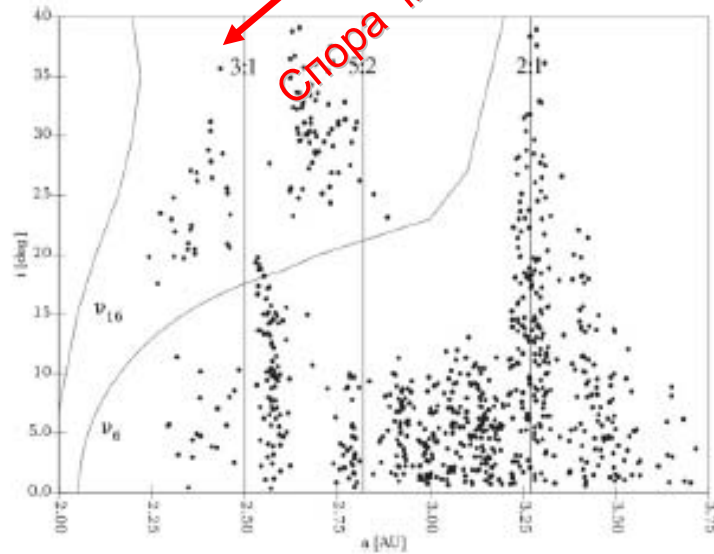
Астероиди $D > 50 \text{ km}$

→ брза миграција даје боље слагање са данашњом (a, i) расподелом



Слора миграција

Nice II - модел (брза)



Настањиве планете

Многе варијанте еволуције џиновских планета могу бити фаталне за еволуцију настањивих терестричких планета.

Ако су, на пример, продукт фазе нестабилности ексцентричне орбите џинова, онда ће и терестричке планете које “преживе” могућност судара са централном звездом или хиперболичног избацавања из система, имати екстремне ексцентричности, неспојиве са настањивошћу.

Закључак: настањива Земља у нашем систему могућа је само зато што су ексцентричности орбита наших џинова мале у поређењу са онима екстра-соларних планета.

ХВАЛА!